

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені В.Н. Каразіна**

КОВТУН Володимир Євгенійович

УДК 539.12+539.1.074

**МЮОННІ ДЕТЕКТУЮЧІ СИСТЕМИ
УСТАНОВОК CDF II (FNAL) І ATLAS (CERN)**

01.04.16 – фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2018

Дисертація є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному університеті імені В.Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук,
академік НАН України, професор
Азарєнков Микола Олексійович,
Харківський національний університет
імені В.Н. Каразіна, фізико-технічний факультет,
проректор з науково-педагогічної роботи

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
Жмурін Петро Миколаєвич,
Інститут сцинтиляційних матеріалів НАН України,
м. Харків, старший науковий співробітник,
завідувач відділу пластмасових сцинтиляторів

кандидат фізико-математичних наук,
Сотников Володимир Васильович,
Національний науковий Центр "Харківський фізико-
технічний інститут" НАН України, м. Харків,
старший науковий співробітник

Захист відбудеться " 26 " квітня 2018 року о 15⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.051.12 Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна за адресою: 61108, м. Харків, пр. Курчатова, 31, ауд. 301.

З дисертацією можна ознайомитись у Центральній науковій бібліотеці Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна за адресою: 61022, м. Харків, майдан Свободи, 4.

Автореферат розісланий " 26 " березня 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої Вченої ради



Ггах А.Г.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Ключові експерименти в галузі фізики високих енергій можна проводити, як правило, на колайдерних установках, які створюються протягом тривалого часу великими об'єднаннями вчених багатьох країн. Успіх таких експериментів, в основному, обумовлений розвитком методів реєстрації частинок та створенням і оптимізацією детекторів, призначених для умов роботи на колайдерах. Особливо наочно це видно з експериментів з вивчення топ-кварка.

Топ-кварк офіційно був відкритий у 1995 р. на установках DØ та CDF [The Collider Detector at Fermilab. The CDF II. Detector Technical Design Report, Fermilab-Pub-96/390-E, 1996] на pp -колайдері Теватрон (FNAL) зі світністю $10^{30} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ при енергії взаємодії в системі центру мас $\sqrt{s} = 1.80 \text{ TeV}$. Однак, статистичні дані за чотири роки (RUN I) спостережень становили всього кілька десятків подій. Тому для статистичної забезпеченості підсумкові дані були об'єднані з результатами другого експерименту Фермілаба – DØ, що, все ж таки, дало змогу говорити дійсно про експериментальне відкриття топ-кварка. Це фундаментальне відкриття на сьогодні істотно підтверджує сучасну теорію елементарних частинок – Стандартну модель (СМ). Інші теоретичні моделі (суперсиметрії, техніцвета, нової U(1)-симетрії, кольорового топ-кварка, топ-кварк-солітонів та ін), які передбачають появу «нової фізики» в діапазоні $100 \div 200 \text{ GeV}/c^2$, жодним чином на сьогодні в експерименті не проявилися.

Тому актуальним є дослідження кінематичних умов народження топ-кварка, уточнення його маси, заряду, перерізу народження, можливих каналів розпаду та ін, що, без сумніву, має фундаментальне значення для перевірки різних моделей фізики частинок і підтвердження та розвитку СМ.

Експерименти з фізики високих енергій проводяться великими колабораціями на колайдерних установках типу спектрометрів CDF або ATLAS (LHC, CERN), що складаються з багатьох детекторів різних типів. Від оригінальної конструкції, унікальних параметрів і якомога меншої вартості створюваних детекторів залежить успіх усієї наукової програми колаборації.

Незмінною важливою складовою частиною таких спектрометричних комплексів є сцинтиляційні лічильники, які часто складають єдиний (мюонний) комплекс з координатними газовими детекторами, де швидкодіючий сцинтиляційний детектор використовується для вибору (як тригер) шуканої події (сигнатури). Прикладом такого комплексу і є детектори мюонного тригера CDF II, які були створені з ініціативи та за безпосередньої участі ХНУ імені В.Н. Каразіна (ХНУ) на основі пластмасових сцинтиляційних детекторів у період модернізації CDF II (RUN II).

Основні зусилля співпраці «Полімерний калориметр» (Харків-Дубна) були спрямовані на розробку конструкції детекторів нового покоління, де вперше було застосовано волоконне зчитування сигналу на малогабаритний фотопомножувач (ФЕП) і отримано рекордні значення світловиходу (~ 25 фотоелектронів з детектора довжиною понад $\sim 3 \text{ м}$). Це дало можливість створити повномасштабну мюонну систему CDF II при мінімальних витратах, у стислі терміни та організувати масове виробництво, забезпечивши тестування мюонних лічильників на основі розробленої методики калібрування ФЕП. Також було розвинено нові методи дослідження пластичних сцинтиляторів та фотоприймачів: отримані аналітичні наближення форми відгуку реального фотопомножувача і створені програми в пакеті ROOT

(CERN) для обробки амплітудних спектрів, що дало можливість провести прецизійне калібрування сцинтиляційних детекторів та їх докладне вивчення.

Переваги нового мюонного детектора було вивчено на космічних мюонах. Далі було організовано масове виробництво у Харкові та Дубні на основі удосконаленої технології для виробництва таких детекторів. У підсумку аксептанс установки CDF II було істотно збільшено (на $\sim 60\%$), що забезпечило накопичення інтегральної світності до $\sim 2 \text{ fb}^{-1}$ у період RUN II (2000÷2010 pp.), що у кілька разів перевищила світність, набрану в першому сеансі RUN I. Таким чином, було здійснено перехід до статистично забезпечених експериментів і розпочато новий напрям у фізиці високих енергій - фізика топ-кварків.

Фізика топ-кварка є також однією з першочергових задач установки ATLAS [ATLAS Detector and Physics Performance. Technical Design Report. ATLAS Collaboration. Volume I, II. CERN/LHCC-99-14,15. 25 May 1999. P. 1÷964.] ще й тому, що це дало б можливість установити припустиме значення маси бозона Хіггса в межах СМ. Моделювання показало, що треба дуже добре формувати мюонний тригер також з урахуванням втрат енергії уздовж трека, що можна було б зробити за допомогою калориметрів.

У межах співпраці RD-34 (CERN), яку було спеціально організовано для розробки калориметричної системи установки ATLAS, досконально вивчено прототип адронного калориметра у пучках e , μ , π на прискорювачі SPS, а також вперше показано можливість вимірювання енергії мюона. Результати експериментів також добре узгоджуються з результатами попереднього моделювання. Дослідження топ-кварка на LHC дає обмеження на масу бозона Хіггса через його розпад на Z - і W -бозони з подальшими розпадами через мюон. Адронний калориметр може забезпечити вимірювання енергії мюонів до 300 GeV. При проходженні мюона крізь пасивну речовину (Fe) калориметра в діапазоні до 100 GeV переважають іонізаційні втрати, а вище – радіаційні. Координати мюона після проходження крізь калориметри ATLAS (порядку 100 радіаційних довжин) вимірюються дрейфовими камерами, тобто трек мюона в калориметрі можна відновити.

Тому до побудови повномасштабної установки з метою оптимізації конструкції та налагодження методик системи Muon Spectrometer ATLAS важливо було визначити реальну можливість вимірювання енергії мюона та порівняти експериментальні значення втрат мюонів у пасивній речовині з існуючими теоретичними обчисленнями. До отримання цих експериментальних результатів існували як розбіжності в теоретичних розрахунках втрат мюонів при високих енергіях, так і брак експериментальних даних. Наприклад, вимірювання Європейської мюонної колаборації (EMC), зроблені в діапазоні переважання гальмівного випромінювання, показали гарну згоду з формулою Цяя. Дані колаборації BCDMS добре узгоджуються з обчисленнями за формулою Кокоуліна-Петрухіна втрат за рахунок народження пар і з формулою Петрухіна-Шестакова для втрат за рахунок гальмівного випромінювання. Однак, різниця результатів за формулами Цяя і Петрухіна-Шестакова становила велику величину – до 20 %. У вимірюваннях RD-34 у діапазоні енергій налітаючих мюонів 1,5÷150 GeV вперше отримані експериментальні дані, що дають можливість порівняти обчислення за згаданими формулами.

Однією з важливих проблем конструювання сцинтиляційних детекторів для колайдерів є їхня радіаційна стійкість (одне первинне зіткнення на LHC дає близько 10^9 вторинних частинок). Навіть для віддалених від вершини взаємодії мюонних детекторів необхідно враховувати радіаційне пошкодження, в тому числі і від нейтронів. Для сцинтиляційних детекторів вимоги є досить жорсткі ~ 100 Мрад за 10 років експлуатації. Один із шляхів вирішення цієї проблеми – опромінення вже повномасштабних прототипів детекторів у пучках частинок з подальшим прогнозуванням їх властивостей. Таку роботу було проведена в ХФТІ НАНУ для прототипа ЕМ-калориметра колайдера Superconducting Super Collider (SSC), що дало можливість уперше отримати експериментальні значення падіння енергетичного розрізнення з дозою і подальше його відновлення (annealing).

Для експериментів на прискорювачах надвисоких енергій (SSC, LHC, ILC, Tevatron) виникла потреба в сцинтиляційних детекторах великого об'єму (для електромагнітних, адронних калориметрів) та великої площі (мюонних детекторів) – їх параметри при радіаційному навантаженні від вторинних частинок прискорювачів (технічна та об'ємна довжини загасання) будуть істотно залежати від геометричних розмірів. У цілому, установки типу ATLAS є настільки великі, що заміна пошкодженого детектора є неможливою протягом усього періоду служби. Тому для колайдерних детекторів є надзвичайно важливою радіаційна стійкість і довготривала стабільність їх параметрів. Жорсткі вимоги висувають не лише до конструкції детекторів, але і до самих сцинтиляційних матеріалів. Висока прозорість до власного випромінювання, великий світловихід, добре енергетичне розрізнення та малий час висвічування мають по можливості не дуже сильно погіршуватися протягом прискорювального сеансу. Також необхідно було враховувати доступність матеріалу, його вартість при великих обсягах виробництва, технологічність обробки сцинтиляційного матеріалу при масовому виготовленні детекторів великої площі та об'єму. З ініціативи ХНУ було створено і виконано дослідницьку експериментальну програму з пошуку (скринінгу) і дослідження нових сцинтиляційних матеріалів, сцинтиляційних добавок до них і добавок, що поліпшують їх радіаційну стійкість. Було розроблено пластмасовий сцинтилятор UPS-923, з якого були виготовлені понад 1000 мюонних лічильників установки CDF II і створені прототипи адронних калориметрів для спектрометра ATLAS.

Таким чином, були створені детектори для сучасних колайдерних експериментів, доведено їх працездатність у радіаційних полях прискорювачів великих енергій, розроблені нові методи калібрування та тестування сцинтиляційних мюонних і калориметричних систем та детекторів, організовано їх масове виробництво, що, в цілому, сприяло успіху фізичних програм колаборацій CDF II і ATLAS. Цей досвід використовується в даний час при створенні детекторів для електронного колайдера ILC, прототипів детекторів установки $\mu 2e$ (FNAL).

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано в ХНУ у рамках держбюджетних тем (ДР № 0106U003138, «Структура атомних ядер та фізика процесів, викликаних сильними, електромагнітними і слабкими взаємодіями»; ДР № 0115U000474, «Структурні ефекти в сильних і електромагнітних взаємодіях та особливості радіаційного впливу та наноструктури»; ДР № 0115U000473, «Рідкісні ядерні процеси і розпади,

спектроскопія розпадів та структура ядер»), робіт за міжнародними угодами кафедри експериментальної ядерної фізики фізико-технічного факультету, а також згідно з Протоколами про співпрацю з ОІЯД, договорами про співпрацю з ННЦ ХФТІ НАНУ, ІПМ НАНУ, НТК «Інститут монокристалів» НАНУ, ХПІ.

Частина роботи було виконана в ОІЯД, де автор працював за контрактом, у Міжнародному центрі ядерних досліджень (CERN) за грантом INTAS-94-1171.

Мета роботи і завдання досліджень.

Метою роботи і завданнями цієї роботи було:

1) створення повномасштабної мюонної системи сцинтиляційних детекторів нового покоління мюонного тригера установки CDF II з метою збільшення аксептанса і швидкості набору даних при експериментальному вивченні топ-кварка; розробка методів їх калібрування, тестування та вимірювання параметрів в on-line та в off-line режимах;

2) пошук нових матеріалів та нових конструкцій великих сцинтиляційних мюонних детекторів з метою підвищення їх радіаційної стійкості у довготривалих експериментах на колайдерах FNAL, LHC, ILC; дослідження довготривалої стабільності їх параметрів та прогнозування термінів роботи таких детекторів;

3) доведення можливості вимірювання параметрів мюона в адронному калориметрі та створення діючого прототипу адронного калориметра установки ATLAS (по проекту RD-34, CERN); отримання нових експериментальних даних з енергетичних втрат мюонів у речовині в діапазоні енергій $1 \div 150$ GeV.

Об'єкт дослідження – сцинтиляційні детектори великих розмірів для застосування в експериментах на сучасних колайдерах; нові методики прецизійного вимірювання їх параметрів; особливості конструкції мюонних детекторів для колайдерів; радіаційні та сцинтиляційні властивості матеріалу мюонних детекторів, властивості збору світла з детекторів великих розмірів; експериментальні та вимірювальні стенди для розробки та налагоджування великих мюонних детекторів.

Предмет дослідження – мюонні детектори установки CDF II та мюонна система установки ATLAS, нові методики прецизійного вимірювання їх параметрів на експериментальних стендах та в пучках частинок.

Методи дослідження – прецизійні вимірювання параметрів сцинтиляційних детекторів і матеріалів на спеціалізованих стендах і в пучках e , μ , π , p прискорювачів ЛПЕ-2 GeV, Нуклотрона, SPS; розробки нових конструкцій великих мюонних детекторів та систем збору і обробки світлових сигналів з них; розробка аналітичного та чисельного (на базі framework ROOT) підходу до вибору функцій фітування реального відгуку вакуумних та напівпровідникових фотоприймачів; науковий супровід при масовому виробництві мюонних детекторів установок CDF II та ATLAS; проведення калібрувальних і тестових вимірювань параметрів детекторів на стендах з радіоактивними джерелами.

Наукова новизна отриманих результатів визначається наступним:

- уперше створено мюонну систему на основі великогабаритних сцинтиляційних лічильників нового покоління зі спектрозміщуючими волокнами (застосовано для установки CDF II, на колайдері Теватрон во FNAL);

- уперше розроблено нову методику збору світла з великого сцинтиляційного детектора на малогабаритний фотоприймач, аналітично отримана формула

наближення спектра відгуку реального фотопомножувача і розроблені програмні коди для цих цілей на базі ROOT (застосовано на вимірювальних стендах);

- створено повномасштабний прототип комбінованого адронного калориметра, що дало можливість ідентифікувати мюони і виміряти їх параметри, на якому вперше проведено точні вимірювання повних енергетичних втрат мюона в речовині в діапазоні енергій $1 \div 150$ GeV (застосовано для установки ATLAS на колайдері LHC);

- отримано дані про радіаційні властивості, довготривалу стабільність параметрів нових сцинтиляційних матеріалів і сцинтилюючих добавок для роботи за умов великих радіаційних навантажень на сучасних колайдерах (використано для колайдерів SSC, SPS, LHC, Tevatron, Nuclotron).

Практична цінність отриманих результатів.

Введено в дію повномасштабну мюонну систему [18] CDF II (2002÷2015 pp.), що дало можливість збільшити статистику набору подій з топ-кварком до 318 пб і досягти найбільш точного визначення маси t-кварка: $M_{\text{top}} = 173,5 \pm 3,6$ (стат.) GeV/c² в каналі розпаду «лептон + струмені» і $M_{\text{top}} = 170,1 \pm 6,0$ (стат.) $\pm 4,1$ (сист.) GeV/c² в каналі «ділептон».

Експериментально показано можливість вимірювання параметрів мюонів адронними калориметрами та отримано втрати мюонів у речовині в діапазоні $1 \div 150$ GeV [15].

Отримані експериментальні дані з калібрування та тестування прототипу модуля RD-34 увійшли до програм з реконструкції параметрів частинок адронного калориметра установки ATLAS [13,14], а також дозволили поліпшити ідентифікацію мюонів і обчислювати їх параметри з максимальною точністю [16].

Отримані при розробці мюонної системи CDF II дані [6,18], експериментальні методи [19], конструкторські рішення [17] дозволять надалі розробляти високоефективні сцинтиляційні лічильники [1,7,8] для довготривалої роботи в радіаційних полях колайдерів.

Особистий внесок здобувача.

1. При виконанні робіт [3,6,17,18,19] автор брав участь у дослідженні сцинтиляційних лічильників мюонного комплексу установки CDF II, в обробці експериментальних спектрів, калібруванні мюонних детекторів, розробці їх конструкції, організації технологічного процесу, розробці обладнання полімеризації і механічної обробки при масовому виробництві сцинтиляційних балок.

2. При виконанні робіт [5,10,13,14,15,16] автор брав участь у розробці конструкції адронного модуля установки ATLAS, у випробуваннях модуля в пучках частинок прискорювача SPS CERN, вимірюванні його параметрів, в отриманні з експериментальних даних інформації про радіаційні втрати мюона.

3. При виконанні робіт [1,2,4,7,8,12] автор брав участь у вимірюваннях параметрів опромінених зразків, розробці і виготовленні стендів, обробці експериментальних даних, брав участь у сеансах опромінення модуля електромагнітного калориметра в пучках електронів прискорювача ЛУЕ-2 GeV в ННЦ ХФТІ.

4. При виконанні роботи [19] автор запропонував модель відгуку реального фотопомножувача і отримав методом характеристичних функцій остаточний вираз для опису спектра, а також розробив коди моделювання та обробки експериментального спектра відгуку реального фотопомножувача в пакетах GEANT4 і ROOT5.

Апробація результатів дисертації.

Результати роботи доповідалися на науково-методичних семінарах Лабораторії високих енергій (ЛФВЕ), Лабораторії ядерних проблем (ЛЯП) ОІЯД, регулярних нарадах мюонної групи CDF ОІЯД і калориметричної групи ATLAS, конференціях: X International Seminar on High Energy Physics Problems, 24-29 September, 1990, Dubna, Russia; 4th International Conference on Calorimetry in High-energy Physics, La Biodola, 19-25 September, Isola d'Elba, Italy, 1993; International Conference on Nuclear Spectroscopy and Nuclear Structure, Dubna, 1993; Conference on New Developments in Photodetection, BEAUNE'96, 24-28 Jun 1996, Beaune, France; 8th International Conference on Calorimetry in High Energy Physics, 13-19 Jun 1999, Lisbon, Portugal; «ICMART-2008», 16-21 листопада, 2008, м. Харків, Україна; The 2-nd International Conference "Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy. NPAE-2008", June 9-15, 2008, Kyiv, Ukraine; Workshop "Mesons and Related Topics" February 11-16, 2008, at the IST, Lisbon, Portugal; 59 International Meeting on Nuclear Spectroscopy and Nuclear Structure. "NUCLEUS 2009", June, 15-19, 2009, Cheboksary, Russia Фед.; International Symp. On Exotic Nuclei, Conf. date: 28 September–2 October 2009, Sochi, Russia; XI Конференція з фізики високих енергій, ядерної фізики і прискорювачів (11 - 15 березня 2013 р.), м. Харків, Україна; XVII (2004 р.), XIX (2008 р.), XXI (2012 р.) International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems, JINR, Dubna.

Описані в дисертації мюонні лічильники були розроблені, досліджені, виготовлені в повному обсязі, відтестовані і змонтовані на установці CDF II, що дало можливість підвищити аксептанс при наборі експериментального даних по топ-кварку. Вперше здобуті експериментальні дані з поглинення мюонів при їх проходженні крізь речовину у діапазоні енергій $1 \div 150$ GeV були використовані при розробці установки ATLAS, увійшли до баз даних та програм моделювання.

Публікації. Всього за темою дисертації опубліковано 20 робіт. З них основні результати опубліковані у 10 реферованих наукових виданнях [6÷8,13÷19], а решта: видання ОІЯД [1,2,12], arXiv [17], SSC [3], FNAL [4], CERN [5,9÷11].

За цикл робіт зі створення мюонної системи CDF II присуджено першу премію ОІЯД за роботу «Детектори на основі пластичних сцинтиляторів» (№ 2483, ОІЯД). У дисертації узагальнено результати робіт, виконаних автором у 1991÷2015 рр. в ХНУ, ОІЯД, ННЦ ХФТІ, ЦЕРН.

Структура та обсяг дисертації.

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів і висновку, в якому наведено основні результати, списку використаних джерел. Повний обсяг дисертації – 144 сторінок, у тому числі: 59 – рисунків, 5 таблиць, бібліографія із 119 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У вступі показано важливість і актуальність роботи, сформульовані цілі роботи, результати, підкреслені їх новизна і практична цінність, коротко викладено зміст дисертації. Велику увагу приділено новому фундаментальному напрямку останніх років: прецизійному вимірюванню параметрів топ-кварка, що був відкрит на установках FNAL. Розглянуто основоположну експериментальну роль мюонних сигнатур при реєстрації топ-кварка на установках CDF II (ФНАЛ) і ATLAS (ЦЕРН).

У **першому розділі** коротко наведено основні фундаментальні проблеми, пов'язані як зі Стандартною моделлю (СМ) фізики елементарних частинок, так і з новими моделями та ідеями. На сьогодні СМ – мінімальна модель, заснована на групі калібрувальних симетрій $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$, і яка описує всі відомі на сьогоднішній день експериментальні дані у фізиці високих енергій. Однак, СМ має близько двадцяти вільних параметрів: константи взаємодій, маси частинок, параметри змішування матриці Каббібо-Кобаяші-Москава, параметри нейтрінних осциляцій тощо. Нещодавно на LHC було експериментально доведено існування Хігс-бозона.

У 1995 році на установці CDF II (рис.1.) було уперше відкрито топ-кварк і виміряно його масу. Описується комплекс прискорювачів Теватрон (FNAL) і установка CDF II, в розробці мюонної системи [3,6,17,18] автор брав безпосередню участь. Наведено фізичну програму колаборації CDF II, де мета полягає в підвищенні повної енергії в системі центру мас частинок, що стикаються з $E_p = 1.80 \text{ TeV}$ до $E_p = 1.96 \text{ TeV}$, світності з $L = 2.5 \cdot 10^{31} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ до $L = 2.5 \cdot 10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ (у RUN I і RUN II відповідно), а також подальше удосконалення детекторів і збільшення аксептанса установки. Реалізація цієї програми дало можливість різко збільшити статистику даних по топ-кварку.

Мюонний комплекс (МК) грає принципову роль на установці CDF II. Він складається з сцинтиляційних лічильників і дрейфових камер. Мюонний тригер і реконструкція мюонів є коренем декількох фізичних програм. Топ-кварки ідентифікують через мюонні розпади частинок, що складаються з W-бозона і b-кварка. Завдання МК – ідентифікувати мюон і визначити його імпульс у магнітному полі детектора за координатами з дрейфових камер.

Відповідальність групи ХНУ-ОІЯД (проект «Полімерний калориметр») полягала в створенні мюонного комплексу тригера, прогнозуванні його ефективної роботи.

Сцинтиляційні лічильники CDF II покривають інтервал псевдошвидкостей $0 < |\eta| < 1.5$ (рис. 1), і вони згруповані в наступні підсистеми:

центральний мюонний детектор – CSP (Central Scintillator uPgrade), інтервал – $0 < |\eta| < 0.6$; розширення центрального мюонного детектора – CSX (Central Scintillator eXtention) і лічильники CSX-"miniskirt" (MSK), інтервал – $0.6 < |\eta| < 1.0$; лічильники передньої мюонної системи – IMU (Intermediate Muon Upgrade), BSU (Barrel Scintillator Upgrade) і лічильники – TSU (Toroid Scintillator Upgrade), інтервал псевдошвидкостей – $1.0 < |\eta| < 1.5$.

Ефективне функціонування лічильників мюонного тригера CDF II було показано при наборі фізичних даних у проведеному на Теватроні сеансі RUN II. Серед отриманих фізичних ре-зультатів відзначимо таке: одне з найточніших вимірювань маси кварка $M_{\text{top}} = 173,5 \pm 3,6 (\text{стат.}) \text{ GeV}/c^2$ (канал розпаду «лептон + струмень»),

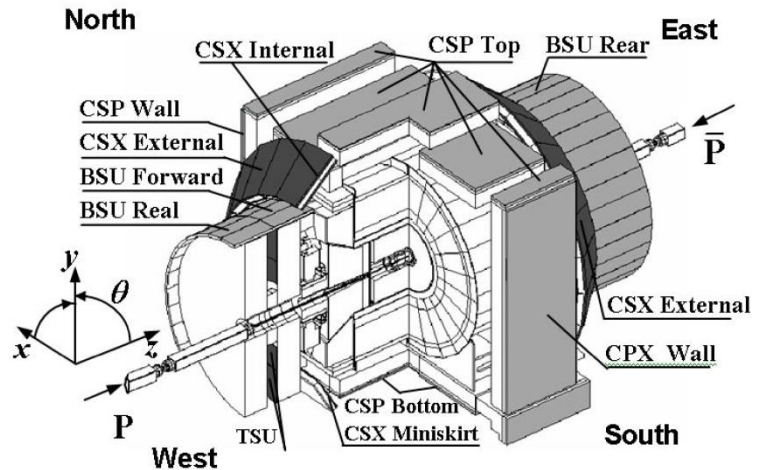


Рис. 1. Система мюонних сцинтиляційних лічильників установки CDF II.

$M_{top}=170,1\pm6,0(\text{стат.})\pm4,1(\text{си-ст.})$ GeV/c² у каналі «ділептон», найбільш точне вимірювання маси W-бозона $M_W=80413\pm48,0(\text{стат.})$ MeV/c², інші значущі результати по 0B_s - 0B_s -змішуванню, перевірці СМ тощо. В отриманні цих результатів визначальну роль грала висока ефективність при реєстрації електронів (до 96%) і мюонів (до 90%) в 4 π -геометрії. В цілому мюонна система (понад 1140 лічильників) забезпечила досягнення істотного результату: аксептанс (рис.2.) мюонної системи установки CDF II був збільшений на 60%.

Харківській групі (автор був безпосереднім ініціатором її створення й активним учасником наукової програми) вдалося розробити і створити повномасштабний 4 π -комплекс мюонних лічильників [6] установки CDF II [17,18], що різко підвищило статистику набору даних по топ-кварку і стало розвитком нового напрямку фундаментальної фізики - прецизійного вимірювання параметрів топ-кварка.

У другому розділі наведені детальні результати розробки і дослідження власне сцинтиляційних лічильників МК CDF II. Описані: метод тестування, модель фотопомножувача [19], методика абсолютного калібрування фотосенсорів і сцинтиляційних детекторів, технологія якісної механічної обробки довговимірних сцинтиляційних пластин. Підкреслено ключову роль харківської групи CDF (кафедри експериментальної ядерної фізики ХНУ – КЕЯФ, НТК «Інститут монокристалів», заводів ХЗХР, ХАЗ) при дослідженні та виробництві детекторів.

У лічильниках нового покоління [6,17,18] збирання світла проводилося полімерними багатооболонковими волокнами, що зміщували спектр (з добавкою Y11 фірм Bicron та Kuraray), і фотосенсором H5783 (ФЕП R5600 фірми Hamamatsu): діаметр фотокатода - 8 мм, квантова ефективність H5783 - ~12 % при ~500 нм (що близько до поглинання Y11). Оптоволоконне знімання світла має важливі переваги в порівнянні з класичним методом збирання світла плексигласовими світловодами:

- менші втрати світла завдяки більш короткому шляху його розповсюдження в об'ємі сцинтиляційної довговимірної пластини (поперек, а не уздовж пластини);
- менша залежність ефективності від деградації оптичних властивостей самої сцинтиляційної пластини, що дає більший термін експлуатації;
- зменшення зони нечутливості за рахунок компактності ФЕП і відсутності світловоду;
- для такої конструкції непридатна теорема Ліувілля при поширенні світла в складних оптичних системах;
- за рахунок меншого шляху світла до волокна скорочується кількість віддзеркалень від поверхні сцинтиляційної пластини;

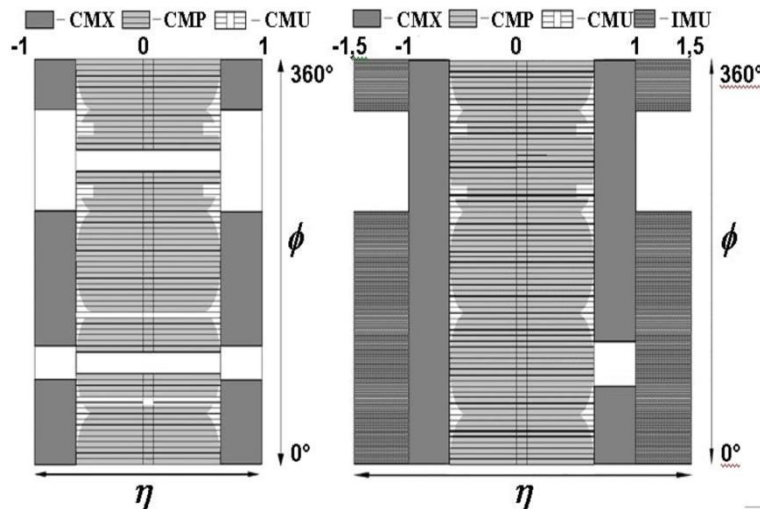


Рис. 2. Аксептанс мюонної системи CDF II: RUN I – ліворуч, RUN II – праворуч.

- невеликі фотопомножувачі менше відчують магнітне поле, тому лічильники можна розташовувати ближче до магнітів;
- малогабаритні фотопомножувачі є дешевшими за звичайні фотопомножувачі;
- в принципі, розвиваючи ідеї з волоконнооптичним зйомом світла, можна об'єднати в процесі складання лічильника операції клеєння і виготовлення сцинтилятора за рахунок вдавнення волокна в об'єм пластика;
- відкривається перспектива використання багатоанодних ФЕП для зчитування декількох пластин, а також використання кремнієвих фотопомножувачів (SiPM).

До початку робіт за програмою CDF II не було прецеденту створення конструкції великого мюонного лічильника з волоконним зчитуванням. Тому для того, щоб довести принципову можливість і аргументи в перевазі такої конструкції, були виготовлені два прототипи лічильника [6] з розмірами $300 \times 30 \times 2$ см³ з матеріалу, який пізніше став відомий як UPS923A (Ukrainian Plastic Scintillator) зі складом на основі полістиролу з первинною добавкою РТР–2 % та вторинною добавкою РОРОР–0,3 % [4]. Вихід світла становив ~50 % відповідно світловиходу антрацену. Налагодження методики обробки сцинтиляторів було здійснено на Харківському авіазаводі (ХАЗ). В одному кутку пластин зроблені невеликі виїмки для розміщення надмінійторного ФЕП.

Площа виїмки становила всього кількадесятих часток відсотка від повної площі лічильників і тому їх наявність несуттєво змінює геометричну ефективність лічильників. Уздовж вузької довгої сторони пластини були приклеєні оптичним клеєм паралельно один одному двадцять спектрзміщуючих (WLS) волокон фірми KURARAY діаметром 1 мм, що утворюють стрічку. Волоконна стрічка формувалася в зв'язку і приклеювалася всередині адаптера циліндричної форми, зробленого з органічного полімеру. Торець адаптера фрезерували для отримання плоскої поверхні, необхідної для оптичного контакту з фотокатодом ФЕП. Дзеркальну поверхню з протилежного торця волокон виготовляли в наступний простий спосіб – її шліфували та приклеювали алюмінієву стрічку. Як показали подальші вимірювання [3,17], це дало збільшення збирання світла на ~60 %. До торцевої поверхні пластини, в тому числі і до зовнішньої сторони волокон, оптичним клеєм приклеювали світловідбиваючу алюмінієву стрічку для збільшення захоплення світла. Поверхня пластини обгорталася Al-майларом.

Створені лічильники досліджували на стендах в ОІЯД, INFN (Піза, Італія) і ХНУ на космічних мюонах (рис.3). Амплітудні сигнали подавали на зарядово-цифровий перетворювач (ЗЦП) LeCroy ADC 2249A. Сигнали з ФЕП посилювали швидким підсилювачем з метою отримання одноелектронних спектрів, необхідних для калібрування спектрометричного каналу. Спектри зчитували в комп'ютер через контролер крейта КАМАК та оброблялися off-line.

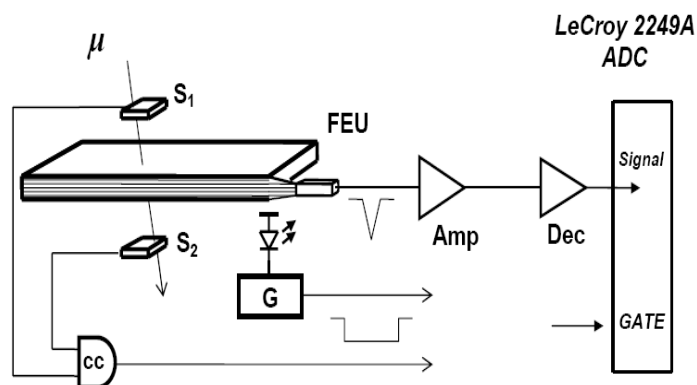


Рис. 3. Стенд вимірювання параметрів сцинтиляторів.

Принцип збирання світла за допомогою волокон WLS застосовували на той час тільки в калориметрії, де площа пластини (tile) є невеликою. Успішне використання волокон у конструкції великогабаритних сцинтиляційних пластин МК забезпечило успіх всієї конструкції в цілому [6,17,18,19].

До недавнього часу вимірювання параметрів великогабаритних лічильників було великою проблемою, що призводило до необґрунтованих технічних рішень при їх конструюванні і великого розкиду параметрів детекторів, які при вимірюваннях погано узгоджувалися між собою і залежали від конструкції детекторів. Для доведення працездатності конструкції лічильника і якості сцинтилятора UPS923A розроблено вперше спеціальну методику вимірювання малої кількості світла [6]. Було переконливо показано [3,18], що можна досягти практично ~100 % ефективності реєстрації мінімально-іонізуючої частинки (m.i.p.) з лічильника великого розміру (3200×300×20 мм³). При масовому виробництві 1140 лічильників цю методику використовували для перевірки якості та калібрування на космічних мюонах. Переваги розробленої методики є особливо важливими при вимірюванні малої кількості світла (з далекого кінця пластини, при визначенні довгострокової стабільності параметрів детекторів, при вимірюванні світловиходу опроміненого малими дозами сцинтиляційного матеріалу).

Основна ідея методу прецизійного вимірювання [3,6,17] полягає в тому, щоб отримати реалістичну функцію відгуку ФЕП і прокалібрувати спектрометричний канал в абсолютних одиницях, тобто в числах фотоелектронів (ф.е.) з дуже малою помилкою. Методом характеристичних функцій автору вдалося отримати шукану функцію [19] для апроксимації реального спектру фотопомножувача в зручному вигляді для подальшого використання при фітуванні реального спектру за допомогою пакету ROOT5. Вона має вигляд:

$$S^{\text{real}}(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\mu^n \cdot e^{-\mu}}{n!} \cdot \left\{ \frac{1-w}{\sigma_n \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(x-Q_n)^2}{2 \cdot \sigma_n^2}} + \alpha \cdot w \cdot \theta(x-Q_0) \cdot e^{-\alpha \cdot (x-Q_n) + \frac{1}{2} \cdot n \cdot \sigma_1^2 \cdot \alpha^2} \right\} \quad (1)$$

де визначені наступні параметри спектру:

$$Q_n = Q_0 + n \cdot Q_1, \quad \sigma_n = \sqrt{\sigma_0^2 + n \sigma_1^2} \approx \begin{cases} \sigma_0 & n = 0, \\ \sqrt{n} \cdot \sigma_1 & n > 0, \end{cases} \quad (2)$$

Знайдена функція відгуку має сім нефеноменологічних параметрів. З формули (1) при великих n можна отримати добре відомий гаусів пік відгуку ФЕП (що дає можливість порівняти з результатами інших підходів):

Шість параметрів описують частину спектру, відповідну реальному сигналу:

- Q_0 – положення п'єдесталу (ймовірність невилітання електрона з фотокатода);
- w – внесок типу шуму в загальний баланс («п'єдестал», термшум діодів та ін);
- α – показник експоненти шумового сигналу;
- μ – середня кількість фотоелектронів, утворених на фотокатоді ФЕП;
- σ_0 – стандартне відхилення п'єдесталу;
- σ_1 – стандартне відхилення розподілу заряду від одного фотоелектрона;
- Q_1 – положення одноелектронного піку.

Параметр Q_1 після цього можна використовувати для калібрування і моніторингу спектрометричного тракту (рис. 4). Таким чином, можна знайти відповідність між числом фотоелектронів і числом каналів ЗЦП з високою точністю, що є основою для прецизійного калібрування спектрометричного тракту. За допомогою описаної процедури на стенді (рис. 3.) вимірюється точна залежність збирання світла від довжини лічильника для космічних мюонів. Після цього за набраним спектром (при заданій відстані) визначається середній сигнал від мюона з наступного виразу: $N_\mu = (Q - Q_0) / Q_1$.

На рис. 5 показана залежність збирання світла від продольної відстані до переднього торця для першого прототипу лічильника довжиною 3200 мм [3,6]. Вимірювання проводилися з зачорненими і алюмінізованими торцями волокон для оцінки якості рефлектора. Експериментальні дані апроксимували функцією $A \cdot \exp(-x/\lambda)$, де λ – ефективна довжина загасання. Оцінена з цих даних ефективна довжина загасання складає 268 см і 473 см для різних умов збирання світла при 25 ф.е. з далекого кінця лічильника [3,6,17], що набагато

більше мінімальної кількості (~10 ф.е.), необхідного для практично 100 % ефективності реєстрації т.і.р. Порівняльний аналіз лічильників однакових розмірів і довжиною 2 м, але виготовлених з різних матеріалів (UPS923A та NE114, Nuclear Enterprises Ltd) показав, що кращі параметри у сцинтилятора UPS923A. Було доведено, що його світловихід був вище на 25 %, а технічна довжина загасання (TAL) становила 260 см [6]. Враховуючи це, а також вартість виготовлення вдалу конструкцію і, в колаборації CDF II було прийняте рішення про масове виробництво мюонних лічильників у Харкові. Виробництво налагоджене було на ХЗХР та ХАЗ.

Таким чином, уперше було експериментально обґрунтована можливість вимірювання кількості фотоелектронів з малою похибкою у великих сцинтиляційних детекторах. В цілому даний підхід дає можливість розробляти сцинтиляційні детектори великих розмірів з оптимальними характеристиками та зменшити їх собівартість. У зв'язку з появою принципово нового типу фотоприймачів, так званих, кремнієвих фотопомножувачів (SiPM), автор застосував описані вище методи та SiPM (фірм ЦПТА та HAMAMATSU) до розробки мюонних детекторів експерименту $\mu 2e$ (FNAL) та нейтронних лічильників установки COMBAS [20]. Низьковольтна напруга, великий коефіцієнт підсилення та квантова ефективність дає можливість вийти на новий рівень сучасних детекторів. Для подальшого розвитку цього напрямку автор розробив стенд КАМАК з блоками LeCroy QDC2249Q, TDC2228 та ін, зробив DAQ на базі LabView 8.6, та стенд на базі швидкодіючого дигітайзера CAEN DT5720D з home-made підсилювачами для SiPM, оскільки ще не існує закінчених

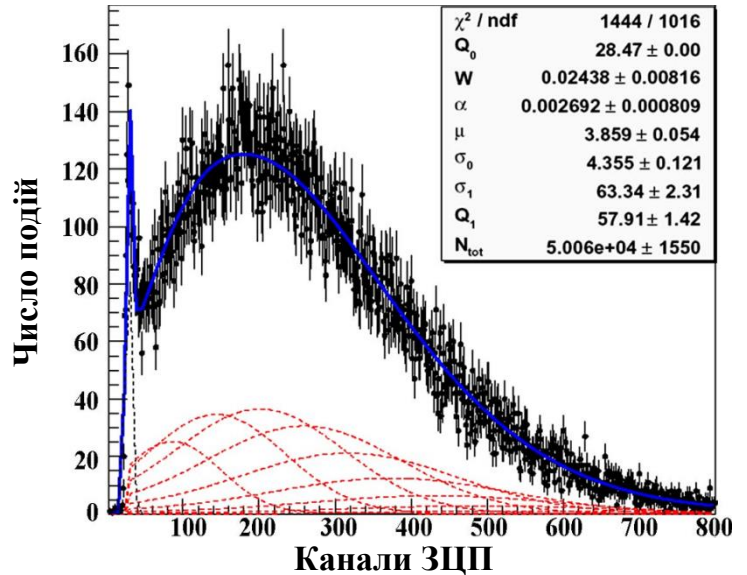


Рис. 4. Реальний спектр з ФЕП-85 від мюонів.
Параматри отримані за формулами 1 і 2.

рішень для цього. Також було виготовлено та досліджено перші прототипи нових сцинтиляційних детекторів для установок $\mu 2e$ та COMBAS.

Автор брав участь у розробці прототипів великих мюонних лічильників з волоконним зчитуванням на малогабаритний ФЕП та вимірюванні їх параметрів [3,6,17,18]. Автор брав участь в організації виробництва мюонних детекторів установки CDF II, у розробці технологічного оснащення, методик тестування при масовому виробництві. Автор провів дослідження та калібрування нового типу фотосенсора - кремнієвого фотопомножувача, який буде застосовано на новій установці $\mu 2e$ (FNAL). Автор запропонував розроблений нейтронний детектор з урахуванням отриманого досліду на CDF II як прототип лічильника типу DEMON для neutron-wall установки COMBAS [20], та дослідив його параметри. Методом характеристикних функцій автор отримав [19] аналітичну формулу для фітування реального спектра ФЕП, параметри якої мають ясний фізичний зміст.

У третьому розділі описано адронний ("tile") калориметр (рис.6) установки ATLAS (LHC, CERN), експериментальне дослідження прототипу групою RD-34 [9,10], а також результати розробки, створення і випробувань адронного модуля [13,14,15,16]. Уперше розвинута проблема точного вимірювання параметрів мюона при проходженні крізь пасивну речовину (калориметр). На прискорювачі SPS були виміряні енергетичні втрати мюона при проходженні крізь прототип калориметра ATLAS, що дало змогу значно уточнити мюонний тригер. Головна функція адронного калориметра ATLAS – забезпечити відновлення енергії струменів при pp взаємодіях, а також гарний вимір $p^{T_{miss}}$ [5,11].

Досягається це на LHC не так просто. Велика енергія взаємодії (14 TeV) у системі центру мас означає необхідність роботи в широкому діапазоні енергій: від GeV до декількох TeV, з реєстрацією до ~ 20 подій за банч, в сильному магнітному полі (1.5 T). Крім того, детектори повинні мати радіаційну стійкість у зв'язку з високою світністю LHC ($10^{34} \text{ sm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) і тривалістю роботи до 10 років. Принцип адронного tile-калориметра установки ATLAS полягає у використанні так званої "проективної" геометрії (рис.6), коли пластини активної речовини (тайли) і пасивного речовини (залізо) розташовані перпендикулярно пучку.

Повномасштабний прототип (рис.6.) був випробуваний [13,14,16] на пучках електронів, мюонів і піонів з енергіями від 10 до 300 GeV/c на прискорювачі SPS

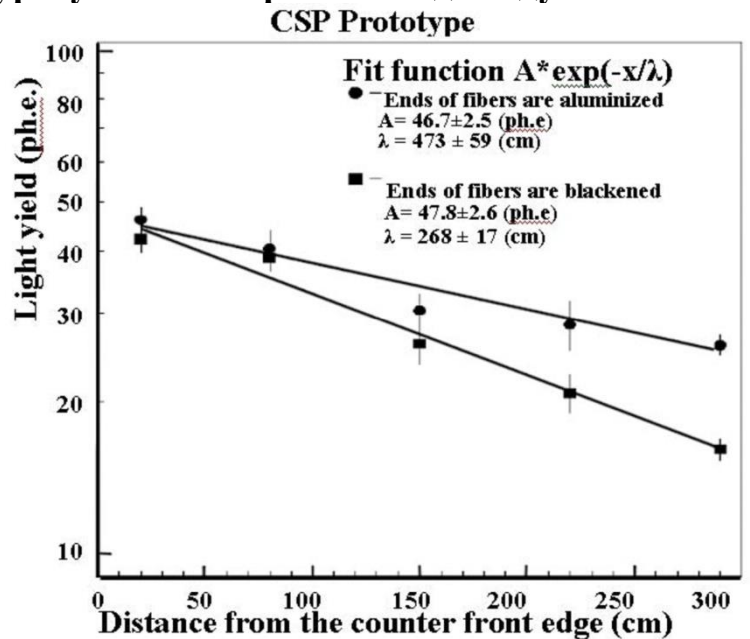


Рис. 5. Остаточні виміри технічної довжини загасання (TAL CSP прототипа) у лічильнику довжиною 300 см.

спільно з прототипом жідкоаргонного електромагнітного калориметра (прототип “barrel” області ATLAS).

Вдала конструкція калориметра дозволяє визначити енергію піонів в діапазоні 20÷300 GeV при лінійності шкали енергії в 1 %;

- витік зливи з калориметра становить не більше 2% (при 9.6 λ і 300 GeV) і визначається з форми зливи;
- кутовий дозвіл зливи визначається з точністю 1.5° (при 300 GeV);
- отриманий вихід калориметра в 64 ф.е./GeV, що дає можливість також виділити мюон з шуму (п'єдесталу).

Отримані наступні результати: одночастковий енергетичний дозвіл адронного калориметра досягає $\frac{\sigma}{E} = \frac{50\%}{\sqrt{E}} \pm 3\%$ досить велика лінійність (у межах декількох відсотків) в діапазоні енергій від 20÷300 GeV при відношенні $\frac{e}{\pi} = 1.1 \approx 1.2$, що майже ідеально для компенсації; енергетичний дозвіл для піонів 6.7% (100 GeV).

Важливе експериментальне завдання RD-34 при розробці прототипу адронного калориметра - вимірювання втрат мюонів в пасивній речовині калориметра, проведення порівняння їх з теоретичними обчислюваннями [15], бо на той час експериментальні дані мали великі похибки, а різні теоретичні підходи давали значні розбіжності.

Це необхідно тому, що однією з важливих функцій адронної калориметрії ATLAS є ідентифікація мюонів та вимірювання їх енергетичних втрат для поліпшення визначення енергії мюона в мюонному спектрометрі. Мюони з $p_T > 2 \text{ GeV}/c$ проходять більш ніж $100 X_0$ речовини в адронному (H) калориметрі, а параметри їх будуть виміряні трековими камерами, розташованими за тороїдним магнітом. На той час енергетичні втрати мюонів дуже високих енергій (вище 10 TeV) були виміряні в експериментах з космічними променями за допомогою магнітних спектрометрів, а в області енергій до 2 GeV були виміряні у численних прискорювальних експериментах.

Було знайдено добра згода між експериментальними і розрахунковими даними за винятком області енергетичних втрат у межах 1÷150 GeV, що актуально для ATLAS. Так, вимірювання колаборації EMC показали, що є значна розбіжність з обчисленнями гальмівного випромінювання мюона (до 20 %). Тому з метою більш точного визначення енергії мюона комбінованим калориметром установки ATLAS, на прискорювачі SPS були експериментально вивчені різні механізми енергетичних втрат мюона за допомогою прототипу калориметра установки ATLAS [5, 9,10,11].

Вимірювання частки різних вкладів втрат енергій в повні втрати мюона в діапазоні енергій 1÷150 GeV [15] було проведено досить детально і увійшло до програми колаборації ATLAS. Виявилося (рис. 8.), що вони добре узгоджуються з

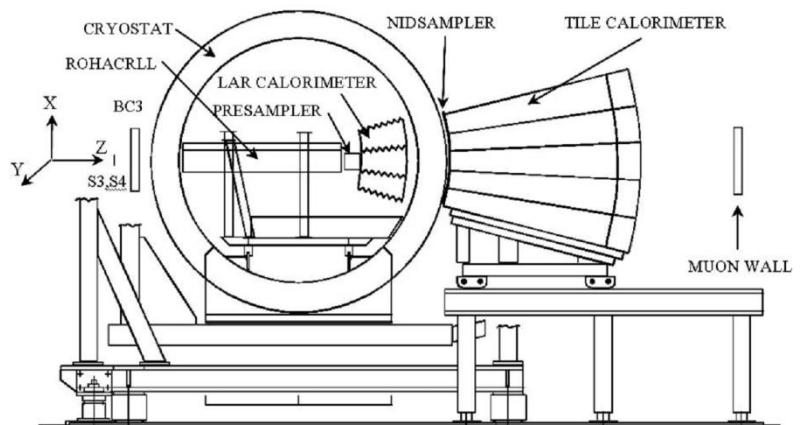


Рис. 6. Прототип калориметра ATLAS на стенді RD-34 (прискорювач SPS).

обчисленнями Кельнера-Котова для процесу народження пар, з формулою Баба при обліку вкладу електронного розсіювання, з обчисленнями Петрухіна-Шестакова для процесів гальмівного випромінювання.

Автор брав участь у всіх етапах розробки і випробувань [5,9,10,11] комбінованого адронного калориметра ATLAS. У рамках робіт з фізичної про-

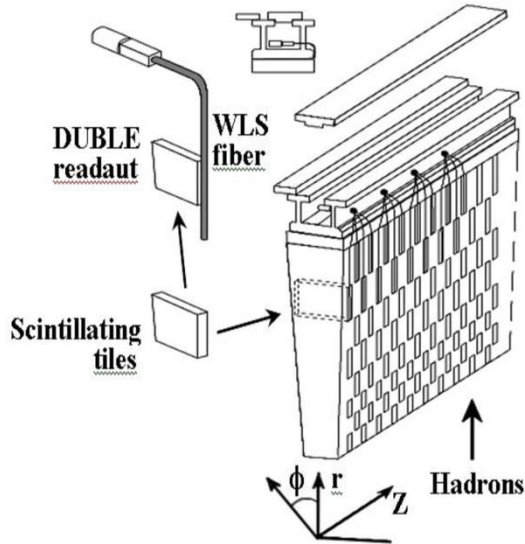


Рис. 7. Принцип конструкції модуля Tile-калориметра установки ATLAS.

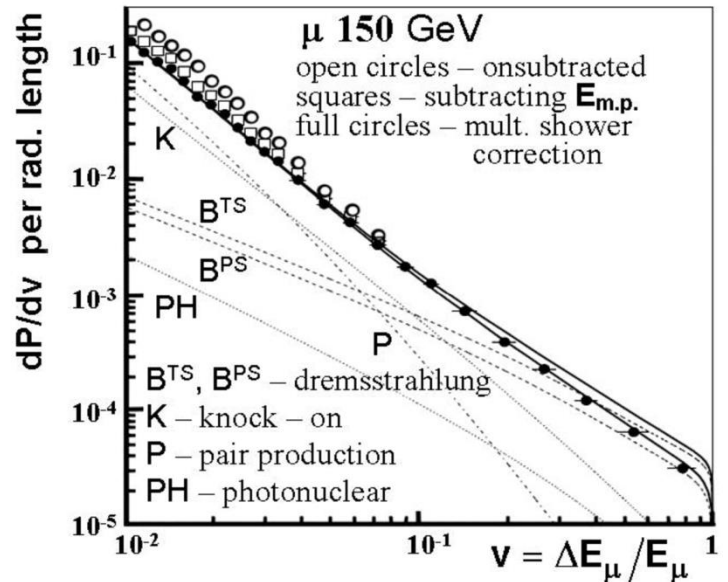


Рис. 8. Експериментальні дані енергетичної роздільної здатності та результати фітірування.

грами RD-34 (CERN) вперше були отримані прецизійні експериментальні дані щодо втрат мюона в речовині калориметра в діапазоні енергій 1÷150 GeV та показана можливість застосування калориметра у мюонному тригері [15].

У четвертому розділі наводяться результати з дослідження радіаційної стійкості сцинтиляційного матеріалу, бо це є одна з найважливіших та необхідних задач при розробці колайдерних детекторів. Це стосується в першу чергу сцинтиляційних детекторів, оскільки вони, як правило, забезпечують запуск всієї установки. Таким чином, статистика рідкісних розпадів істотно залежить від ефективної роботи тригера. В ХНУ вже був накопичений значний досвід в галузі дослідження радіаційної стійкості сцинтиляційних матеріалів, що дозволяло використовувати його і по колайдерній тематиці. Це дало змогу почати глибоке дослідження радіаційної стійкості детекторів нового покоління. У рамках співробітництва «СФЕРА» (ЛБЕ, ОІЯД, м. Дубна) [2] автор брав участь у дослідженні на прискорювачі електронів ЛУЕ-2 GeV (ХФТІ) радіаційної стійкості електромагнітного прототипу "spagetti"-калориметра на основі сцинтиляційних волокон Bicron для колайдера SSC (рис. 9). Були отримані експериментальні дані з енергетичного дозвілу в залежності від дози і тривалості опромінення, ефекту відновлення (annealing) [1].

Шляхом безперервної калібрування і за допомогою введення поправочних коефіцієнтів у процесі прискорювального сеансу можна коригувати параметри сцинтиляційних детекторів. Це можливо робити при відносно невеликих дозових навантаженнях (рис. 10). Але, з деякого моменту деградація стає значною, тим більше, що дозове навантаження в установці розподіляється істотно нерівномірно, і процедури калібрування вже починають плохо працювати. Результати робіт за

участю автора [1,2,4,5,7,8,12] показали, що однією з основних проблем експериментів на колайдерах є радіаційна стійкість сцинтиляційних детекторів. Особливо це стосується електромагнітних і адронних калориметрів, т.к. величезні їх розміри не дають з економічних міркувань іншої альтернативи крім використання пластичного сцинтилятора. У рівній мірі це стосується також і мюонної системи, що добре видно на прикладі значного падіння аксептансу CDF у період RUN I. Тому автором було запропоновано провести дослідження сцинтиляційних матеріалів і добавок (насамперед, скринінг вже наявних) на обладнанні ХНУ, а також створити додатково нові дослідницькі стенди. Сцинтиляційні домішки синтезувалися, в основному, на хімічному факультеті ХНУ імені В.Н. Каразіна, в Інституті монокристалів та закуповувалися колаборацією ATLAS.

У зв'язку із створенням нового покоління прискорювачів істотно підвищилися вимоги до детекторів на основі сцинтиляторів, що мають полістирольну (PS) і полівінілтолуольну матриці (PVT) [8], бо використовуються колосальні обсяги сцинтилятора. Велика вартість силоксанової матриці при кращих радіаційних показниках не давала змогу використовувати її замість PS та PVT. Полістирол також має гарні оптичні показники та випускається промислово. PS-сцинтилятори набули широкого поширення завдяки гарному світловихіді, малому часу висвічування, простоті механічної обробки, можливості виготовлення сцинтиляційного детектора великої площі та об'єму, наявності готового технологічного процесу та обладнання.

Одне з основних властивостей пластика для колайдерних експериментів – низька вартість. Проте радіаційна стабільність недостатня для роботи в колайдерних детекторах (1-2 Мрад), т.к. розрахункова сумарна доза за 10-20 років експлуатації калориметра складає ~100 Мрад у комбінованих $e/\gamma/n$ полях. Найбільш радіаційно-стійкий в той час сцинтилятор SCSN-81T (KURORAY) втрачав світловихід на 15 % при дозі 2.8 Мрад. Таким чином, за рахунок низької радіаційної стійкості сцинтилятор втрачав безперервно свої оптичні параметри під час опромінення у сеансах роботи прискорювача і необхідно було робити калібрування детекторів, аж до заміни опроміненого новим сцинтилятором. У колайдерних експериментах остання процедура виключена у зв'язку з високою світністю прискорювача, що приводить до активації пасивного речовини, значними розмірами експериментальних установок і великими трудовитратами під час заміни.

Тому основні зусилля харківської групи ATLAS були витрачені на пошук пластмасових сцинтиляторів, які не дуже відрізнялися б за складом від трикомпонентних систем на полімерній матриці PS чи PVT з первинною (1÷2 % паратерфенила-РТР) и вторинною (0.005÷0,02 % 1.4-ди-(2-(5-фенилосазо лил))-бензола-РОРОР) люмінесцентними добавками. Були розроблені і нові технології поліпшення радіаційної стійкості. Серед перспективних методів – заміна основи

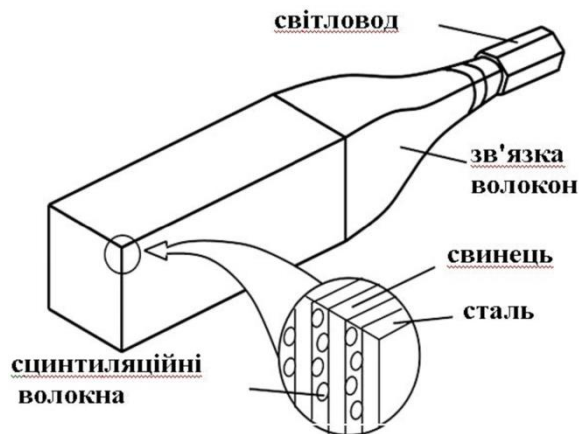


Рис. 9. Конструкція spaghetti-калориметра.

сцинтилятора на полісилоксанової з комерційними добавками, який практично не змінює світловихід при опроміненні в атмосфері аргону аж до дози 18 Мрад. Але цей сцинтилятор не набув поширення через складну технологію його виробництва і високої вартості. Інший метод – введення в полістирольну основу так званих підсилювачів дифузії, речовин, що збільшують рухливість продуктів радіолізу. Але й ці методи поліпшення радстойкості не отримали поширення через технологічні труднощі.

В результаті виконання досліджень за програмами RD-34, ATLAS були виявлені наступні напрямки вирішення проблеми пошуку радіаційно-стійкого сцинтилятора:

оптимізація концентрації різних первинних і вторинних люмінесцентних добавок, синтез нових люмінесцентних добавок, додаткове очищення мономера від домішок, модифікація структури полімеру (зміна молекулярної ваги і просторової структури), застосування спеціальних добавок – «антірад» і стабілізаторів [7]. Таким чином, замість створення повномасштабного прототипу калориметра і дорогого його опромінення на прискорювачі протягом тривалого часу, було запропоновано опромінювати невеликі зразки гамма-гарматою в ХНУ, набираючи точно за часом необхідну дозу. А потім детально дослідити параметри сцинтиляційних матеріалів на стендах з вимірювання світловихіду і довжину поглинання на спектрофотометрі.

Автор описує способи отримання експериментальних зразків і методики їх дослідження на кафедрі експериментальної ядерної фізики ХНУ. Сцинтиляційні композиції готувалися на основі перегнанного у вакуумі стіролу, в який додавалися в певному ваговому співвідношенні первинна і вторинна люмінесцентні добавки, а також речовини, що підсилюють дифузію, стабілізатори тощо. Полімеризація здійснювалася за допомогою спеціалізованого автоматичного калориметра (рис.11) нагріванням в атмосфері азоту при температурі $120\div 140^\circ\text{C}$ протягом 10 ч. з витримкою протягом 2 діб при температурі 160°C . Були розроблені спеціальні полімеризатори з точним відстеженням температури для проведення блочної, ампульної полімеризації, а також полімеризації між оптичним склом.

Опромінення для зразків, що виготовлялися у формі полірованих циліндрів $\varnothing 16$ і висотою 10 мм, проводилося на повітрі при кімнатній температурі на кобальтової гарматі ХНУ дозою 2,8 Мрад при потужності дози 850 рад/хв.

В середньому зразок сцинтилятора втрачає світловихід на 50% при дозі гамма-опромінення на повітрі вже при $2.5\div 5$ Мрад. Досліджувалася зміна основних оптичних і сцинтиляційних величин: пропускання T , світловихіду L та енергетичного дозвілу $R = \Delta E / E$.

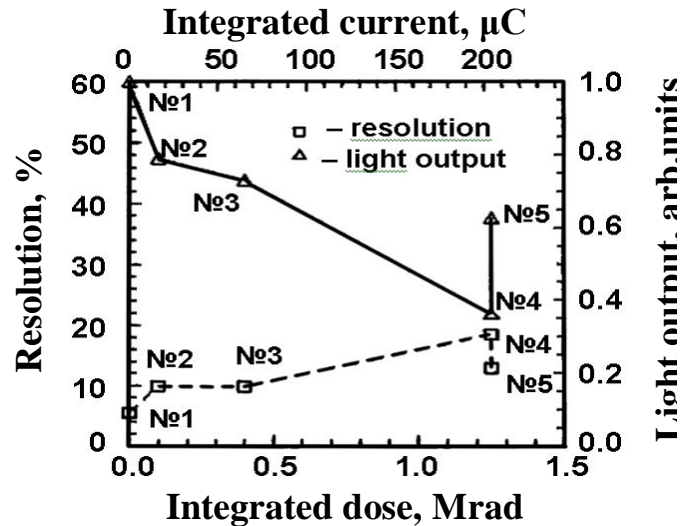


Рис. 10. Залежність відгуку ЕМ-калориметра від поглинутої дози при $E(e^-) = 1.2$ ГеВ: 1 – до опромінування; 2, 4 – зразу після опромінування; 3 – через 3 доби відновлення; 5 – через 9 діб відновлення.

Виміри проводилися через 1,5 ч. після опромінення. Сцинтиляційний вихід вимірювався на спеціальній спектрометричній установці (рис. 12). Досліджуваний зразок встановлювався всередині світловідбиваючого екрану на вікно фотопомножувача (без оптичного контакту). Електрони від радіоактивного джерела ^{137}Cs , проходячи через тонку алюмінієву фольгу відбивача, поглиналися у верхньому шарі досліджуваного зразка. Використовувався ФЕП-39А, спектральна чутливість якого має максимум на довжині хвилі 430 нм. Імпульсний сигнал з анода ФЕП надходив на вхід спектрометричного підсилювача БУС2-97.

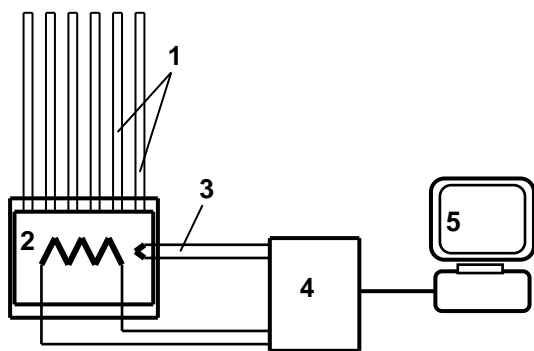


Рис. 11. Стенд полімеризації зразків: 1-ампули з мономером, 2-термошафа, 3- напівпровідникові термометри, 4-система управління та стабілізації, 5-комп'ютер для управління.

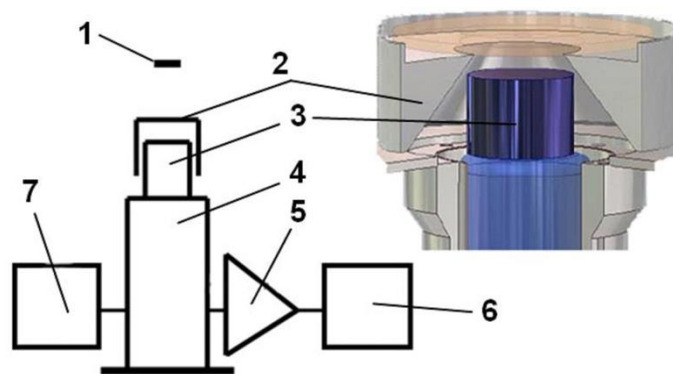


Рис. 12. Установка по вимірюванню світловиходу сцинтиляторів: 1-джерело ^{137}Cs , 2-«домик», 3-зразок, 4-ФЕП, 5-підсилювач БУС2-47, 6-МАН, 7-джерело напруги.

Сформований сигнал підсилювачем подавався на багатоканальний амплітудний аналізатор NAA-1024 (рис. 13). Сцинтиляційний вихід L вимірюваного зразка визначався щодо світловиходу контрольного зразка антрацену як $L=N/N_a$, де N і N_a – номери каналів, що відповідають положенням максимумів піків на спектрах, отриманих на досліджуваному і контрольному зразках відповідно. Похибка світловиходу не перевищувала 2 %. Енергетичний дозвіл $R=\Delta E/E$, де ΔE - ширина піку на напіввисоті, визначалося за піку повного поглинання електронів конверсії з енергією $E_c=624$ кєВ. Оптичне пропускання T щодо повітря без поправки на коефіцієнт відбиття вимірювалося двупроменевим спектрометром Specord UV VIS на довжині хвилі 440 нм. Похибка вимірювання не перевищувала 2%.

Було виготовлено і виміряно більше тисячі різних сцинтиляційних композицій. Виділено основні напрямки підвищення радіаційної стійкості пластмасових сцинтиляторів: оптимізація концентрації первинних (РТР) і вторинних (РОРОР та інших) люмінесцентних добавок,

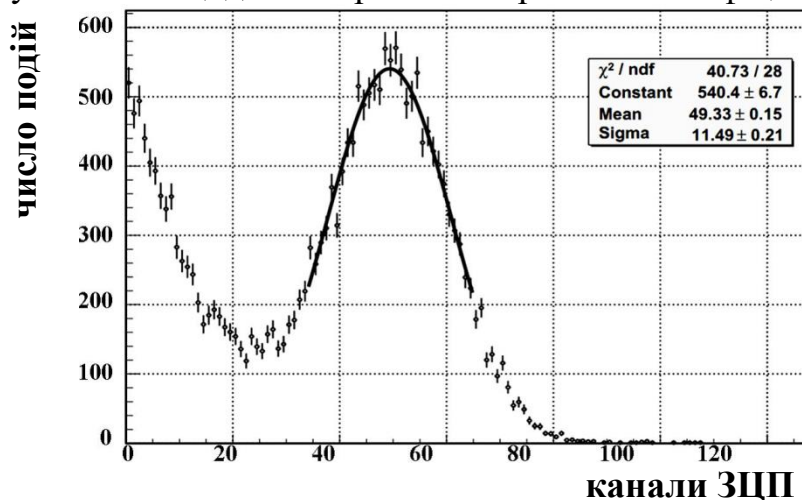


Рис. 13. Приклад амплітудного спектра від сцинтиляційного зразка Ø10x10 мм.

синтез нових люмінесцентних добавок, додаткове очищення мономера і добавок, модифікація структури полімеру (зміна молекулярної ваги і просторової структури), застосування спеціальних добавок - «антірад» і стабілізаторів, добавок, які збільшують швидкість дифузії продуктів радіолізу, а також розширення пошуку (скринінгу) нових добавок і люмінофорів.

У ХНУ за безпосередньої участі автора [4,7,8] було створено ряд стендів з вимірювання параметрів сцинтиляційних матеріалів для колайдерних детекторів, насамперед, мюонних, і організована і здійснена програма з їх експериментального дослідження. Проведена робота дала змогу колаборації CDF II використовувати харківській радіаційностійкий сцинтилятор UPS923A для виготовлення повномасштабного комплексу мюонних детекторів.

ВИСНОВКИ

При виконанні дисертаційної роботи, у рамках міжнародних програм CDF II (ФНАЛ) і ATLAS (ЦЕРН), проведено широке коло експериментальних і методичних досліджень мюонних систем, зроблених з пластмасових сцинтиляторів.

Важливість мюонних систем при виявленні сигнатур рідкісних розпадів детально показано на прикладі прецизійного визначення маси топ-кварка на установці CDF II. При розробці адронного калориметра установки ATLAS отримані експериментально параметри цього прототипу і вперше виміряні дані з радіаційних втрат мюонів в речовині в області великих енергій.

Проведені експериментальні роботи по вивченню радіаційної стійкості сцинтиляційних матеріалів для колайдерних детекторів нового покоління.

Основні наукові результати полягають у наступному:

1. Проведено експериментальні дослідження і розробки мюонних колайдерних систем для установок СФЕРА (нуклотрон), SDC (SSC), CDF II (FNAL), ATLAS (LHC). Розроблено прецизійні методики вимірювання параметрів великих мюонних детекторів (з ФЕУ і SiPM), отриман аналітичний вид функції фітірування реального спектру фотоприймачів сцинтиляційних детекторів.

2. Розроблена та виготовлена унікальна мюонна система сцинтиляційних детекторів для установки CDF II на колайдері FNAL, що дозволило збільшити аксептанс CDF II на 60 % і призвело до збільшення в ~ 100 разів статистиці набору топ-кварка і прецизійному вимірюванню його маси.

3. Розроблено та експериментально досліджено адронний калориметр в «проективній геометрії» (RD34, SPS), що дозволило сформулювати мюонний тригер ATLAS на колайдері LHC. Вперше отримані експериментальні дані по втратах енергії мюона в речовині в діапазоні $1,0 \div 150,0$ Гев, що дозволило ідентифікувати мюон і коригувати його енергію в адронному калориметрі ATLAS.

4. Отримано нові експериментальні дані по радіаційній стійкості полімерних оптичних композицій, які були використані при розробці пласмасового сцинтилятора UPS-923A, що вперше був впроваджений в мюонній системі CDF II.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. S.V.Afanasiev, Yu.S.Anisimov, V.I.Kolesnikov, **V.E.Kovtun**, A.I.Malakhov, A.A.Nemashkalo, A.Para, V.E.Popov, Yu.N.Ranjuk, S.G.Reznikov, E.N.Tsyganov, P.I.Zarubin, A.E.Zatserklyanyi.

Radiation Hardness Tests of a Scintillating Fiber Calorimeter Module // JINR Rapid Communications. –1991. – № 5(51). – P. 38÷41. (Дисертант брав участь у експериментальному дослідженні ЕМ калориметра у пучках електронів на ЛУЕ-2 ГеВ).

2. Ю.С. Анисимов, С.В.Афанасьев, В.К.Бондарев, И.Г.Голутвина, О.В.Егоров, А.Ф.Елишев, Л.Я.Жильцова, П.И.Зарубин, В.Е.Ковтун, В.И.Колесников, В.А.Кузнецов, А.Г.Литвиненко, А.И.Малахов, Е.Н.Матвеева, Т.Д.Пилипенко, С.Г.Резников, О.Г.Рубина, С.А.Седых, А.Ю.Семёнов, А.Ю.Титов, А.Н.Хренов. Сцинтилляционный передний спектрометр установки СФЕРА // Краткие сообщения ОИЯИ. Дубна – 1991. – № 5(51) . – С. 23÷37.

(Дисертант розробив 64-канальний черенковський детектор).

S.V. Afanasiev, Yu.A.Anisimov, V.V.Arhipov, V.V.Balashov, S.N.Bazylev, M.P.Belyakova, A.F.Elishev, D.Enkbold, A.Yu.Isupov, L.K.Ivanova, A.N.Khrenov, V.A.Kuznetsov, V.E. Kovtun, P.Kozma, A.G.Litvinenko, A.I.Malakhov, P.K.Maniakov, G.L.Melkumov, A.S.Nikiforov, V.I.Prokhorov, S.G.Reznikov, A.Yu.Semenov, V.A.Smirnov, V.V.Trofimov, D.V.Uralsky, P.I.Zaribin. An Experiment on the A-Dependence of the Cross Section for Relativistic Deuteron Fragmentation into Cumulative Pions // Краткие сообщения ОИЯИ. Дубна – 1991. – № 5(51) . – С. 5÷13.

(Дисертант брав участь у сеансу накопичення експериментальних даних та їх обробці).

S.V. Afanasiev, Yu.A.Anisimov, S.N.Bazylev, J.Chmielewski, O.P.Gavristhuk, I.G.Golutvina, V.I.Ilyushchenko, L.K.Ivanova, V.S.Korolev, V.E. Kovtun, V.A.Kuznetsov, A.G.Litvinenko, A.I.Malakhov, D.P.Mikhaev, A.S.Nikiforov, A.N.Parfenov, O.G.Rubina, A.E.Senner, A.V.Piliyar, V.V.Trofimov, D.V.Uralsky, V.S.Stavinsky, I.Zborovsky, L.Ja.Zhiltsova, Yu.I.Titov. An Experiment to Search Cumulative Muon Pairs with Low Invariant Mass // Краткие сообщения ОИЯИ. Дубна – 1990. – № 7(46) . – С. 6÷18.

(Дисертант брав участь у сеансу накопичення експериментальних даних та їх обробці).

3. G.Bellettini, J.Budagov, F.Cervelli, I.Chirikov-Zorin, V. Kovtun, O.Pukhov, B.Seminojenko, V.Senchishin, S.Tokar, N.Verezub, I.Zalubovsky, F.Zetti. Test of long scintillation counters for supercollider detectors // SDC Notes. SSC – 1993. – SDC-93-522. – С. 1÷15. (Дисертант брав участь у вимірюванні параметрів сцинтиляторів).

4. V.Senchishin, V.Koba, O.Korneeva, V.Seminojenko, V. Kovtun, I.Zalubovsky, I.Chirikov-Zorin, J.Budagov, F.Markley, G.Bellettini. New radiation stable and long-lived plastic scintillator for the SSC // FERMILAB-TM-1866. –November, 1993.

(Дисертант проводив радіаційні вимірювання сцинтиляторів та розробляв стенди).

5. ATLAS: Technical proposal for a general-purpose p-p experiment at the Large Hadron Collider at CERN. ATLAS TDR 14, CERN/LHCC 99-14, 25 May 1999, ATLAS Collaboration. // CERN-LHCC-94-43. – Dec 1994. – P. 1÷289;

(Дисертант брав участь у розробці проекту адронного калориметру ATLAS).

6. E.N. Bellamy, G.Bellettini, J.Budagov, F.Cervelli, I.Chirikov-Zorin, V. Kovtun, M.Incagli, D.Lucchesi, C.Pagiarone, O.Pukhov, V.Seminozhenko, V.Senchishin, S.Tokar, N.Verezub, I.Zalubovsky, F.Zetti. Test long scintillation counters for supercollider detectors. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. – 1994. – № 343. – P. 484÷488.

(Дисертантом запропоновано розробку та виготовлення сцинтиляційних прототипів детекторів для CDF II з сцинтилятора UPS-923A, брав участь у тестуванні та калібровочних вимірах параметрів мюонних лічильників).

7. И.И. Залубовский, В.С. Коба, В.Е. Ковтун, А.В. Кузниченко, В.Н. Лебедев, Ф. Марклей, В.Н. Семиноженко, В.Г. Сенчишин. Способы повышения радиационной стойкости сцинтилляторов на основе полистирола // Приборы и техника эксперимента. – 1995. – № 5. – С. 76÷84. (Дисертант експериментально досліджував образці сцинтиляторів, розробляв стенди, опромінював на гамма-гарматі, обробляв результати).

8. V. Senchishin, F. Markley, V.N. Lebedev, **V. Kovtun**, V.S. Koba, A.V. Kuznichenko, V.D. Tizkaja, J.A. Budagov, G. Bellettini, V.P. Seminozhenko, I.I. Zalubovsky, I.E. Chirikov-Zorin. **A new radiation stable plastic Scintillator // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. – 1995. – № 364. – P. 253÷257.**

(Дисертант брав участь у експериментальному дослідженню образців сцинтиляторів).

9. A. Astvatsaturov, O. Borisov, J. Budagov, I. Chirikov-Zorin, G. Chlachidze, S. Kakurin, V. Kolomoets, **V. Kovtun**, V. Kukhtin, A. Lebedev, I. Liba, O. Lomakina, Yu. Lomakin, S. Malyukov, I. Minashvili, D. Pantea, O. Pukhov, V. Romanov, N. Russakovich, V. Senchishin, A. Semenov, A. Sissakian, A. Shchelchikov, V. Shevtsov, S. Studenov, S. Tokar, N. Topilin, V. Vinogradov, S. Vorozhtsov, G. Yarygin (CERN-JINR RD34 group). **Construction and Performance of an Iron-Scintillator Hadron Calorimeter with Longitudinal Tile Configuration. RD-34 Collaboration // CERN-LHCC-95-44. – 16 August 1995. – P. 1÷54.**

(Дисертант брав участь у розробці технічного проекту адронного калориметру).

10. A. Astvatsaturov, O. Borisov, J. Budagov, I. Chirikov-Zorin, G. Chlachidze, V. Glagolev, S. Kakurin, V. Kolomoets, **V. Kovtun**, V. Kukhtin, A. Lebedev, Yu. Lomakin, S. Malyukov, I. Minashvili, D. Pantea, O. Pukhov, V. Romanov, N. Russakovich, V. Senchishin, A. Semenov, A. Sissakian, A. Shchelchikov, V. Shevtsov, S. Studenov, S. Tokar, N. Topilin, V. Vinogradov, S. Vorozhtsov, G. Yarygin (CERN-JINR RD34 group). **A measurement of the energy loss spectrum of 150 GeV muons in iron // CERN-PPE/ 96-115. – 19 August 1996, P. 1÷25.**

(Дисертант брав участь у вимірюванні параметрів калориметру).

11. A. Astvatsaturov, O. Borisov, J. Budagov, I. Chirikov-Zorin, G. Chlachidze, V. Glagolev, S. Kakurin, **V. Kovtun**, V. Kukhtin, A. Lebedev, I. Liba, O. Lomakina, Yu. Lomakin, S. Malyukov, I. Minashvili, D. Pantea, O. Pukhov, V. Romanov, N. Russakovich, V. Senchishin, A. Semenov, A. Sissakian, A. Shchelchikov, V. Shevtsov, S. Studenov, S. Tokar, N. Topilin, V. Vinogradov (CERN-JINR RD34 group). **Response of the ATLAS Tile calorimeter prototype to muons // CERN-PPE/96-173. – December 13, 1996. – P. 1÷40.**

12. В.А.Арефьев, В.И.Астахов, Б.В.Батюня, В.К.Бирулёв, А.С.Водопьянов, О.П.Гаврищук, О.М.Голубицкий, Б.Н.Гуськов, Р.В.Еремеев, И.Г.Косарев, Н.А.Кузьмин, М.Ф.Лихачёв, А.Н.Максимов, Д.П.Михалёв, П.В.Номоконов, А.Н.Прафёнов, Н.В.Славин, А.Г.Федунов, Г.С.Шабратова, В.И.Генчев, Х.Х.Гутброд, Б.Колб, М.Пуршке, **В.Е.Ковтун**, В.Г.Сенчишин. **Zero-degree calorimeter for CERN WA-98 experiment. // JINR-5(79)-96. – 1996. – P. 15÷34. Dubna.** (Брав участь у пошуку та виміру стійких до радіації композицій).

13. ATLAS Collaboration (from JINR): A. Astvatsaturov, O. Borisov, J. Budagov, I. Chirikov-Zorin, G. Chlachidze, V. Glagolev, S. Kakurin, V. Kolomoets, **V. Kovtun**, V. Kukhtin, A. Lebedev, I. Liba, O. Lomakina, Yu. Lomakin, S. Malyukov, D. Pantea, O. Pukhov, V. Romanov, N. Russakovich, V. Senchishin, A. Semenov, A. Sissakian, A. Shchelchikov, V. Shevtsov, S. Studenov, S. Tokar, N. Topilin, V. Vinogradov, S. Vorozhtsov, G. Yarygin. **Results from a combined test of an electromagnetic liquid argon calorimeter with a hadronic scintillating-tile calorimeter // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. – 1997. – № 387. – P. 333÷351.**

(Дисертант брав участь у тестуванні адронного калориметра у пучках SPS).

14. ATLAS Collaboration (from JINR): A. Astvatsaturov, O. Borisov, J. Budagov, I. Chirikov-Zorin, G. Chlachidze, V. Glagolev, S. Kakurin, V. Kolomoets, **V. Kovtun**, V. Kukhtin, A. Lebedev, I. Liba, O. Lomakina, Yu. Lomakin, S. Malyukov, I. Minashvili, D. Pantea, O. Pukhov, V. Romanov, N. Russakovich, V. Senchishin, A. Semenov, A. Sissakian, A. Shchelchikov, V. Shevtsov, S. Studenov, S. Tokar, N. Topilin, V. Vinogradov, S. Vorozhtsov, G. Yarygin. **Response of the ATLAS Tile calorimeter prototype to muons // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 1997. – № 388. – P. 64÷78.** (Дисертант брав участь у експериментах по виміру мюонів).

15. RD34 Collaboration (from JINR): A. Astvatsaturov, O. Borisov, J. Budagov, I. Chirikov-Zorin,

- G.Chlachidze, V.Glagolev, S.Kakurin, V.Kolomoets, **V.Kovtun**, V.Kukhtin, A.Lebedev, I.Liba, O.Lomakina, Yu.Lomakin, S.Malyukov, I.Minashvili, D.Pantea, O.Pukhov, V.Romanov, N.Russakovich, V.Senchishin, A.Semenov, A.Sissakian, A.Shchelchikov, S.Studenov, S.Tokar, N.Topilin, V.Vinogradov, S.Vorozhtsov, G.Yarygin. **A measurement of the energy loss spectrum of 150 GeV muons in iron** // *Zeitschrift Für Physik (Z. Phys.)* . – 1997. – С 73. – № 3. – P. 455÷463. (Дисертант брав участь у тестуванні адронного калориметра у пучках SPS).
16. RD34 Collaboration (from JINR): A.Astvatsaturov, O.Borisov, J.Budagov, I.Chirikov-Zorin, G.Chlachidze, V.Glagolev, S.Kakurin, V.Kolomoets, **V.Kovtun**, V.Kukhtin, A.Lebedev, I.Liba, O.Lomakina, Yu.Lomakin, S.Malyukov, I.Minashvili, D.Pantea, O.Pukhov, V.Romanov, N.Russakovich, V.Senchishin, A.Semenov, A.Sissakian, A.Shchelchikov, V.Shevtsov, S.Studenov, S.Tokar, N.Topilin, V.Vinogradov, S.Vorozhtsov, G.Yarygin. **Results from a new combined test of an electromagnetic liquid argon calorimeter with a hadronic scintillating-tile calorimeter** // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*. – 2000. – № 449. – P. 461÷477. (Дисертант брав участь у дослідженні в пучках SPS прототипу HCAL).
17. A.Artikov, J.Budagov, I.Chirikov-Zorin, D.Chokheli, V.Kolomoets, M.Lyblin, O.Pukhov, A.Sissakian, G.Bellettini, F.Chervelli, M.Incagli, A.Menzione, F.Palmonari, A.Scribano, A.Stefanini, D.Cauz, H.Grassmann, G.Pauletta, L.Santi, G.Introzzi, A.Penzo, M.Iori, B.Grinyov, V.Lebedev, V.Lyubynsky, V.Senchishin, **V.Kovtun**, I.Zaliubovsky, I.Fedorko, S.Tokar, N.Giokaris, A. Manousakis-Katsikakis. **Design and construction of new central and forward muon counters for CDF II** // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*. – 2005. – № 538. – P. 358÷371; arXiv:physics/0403079 15 Mar 2004. (Дисертант брав участь у всіх етапах розробки та виготовлення мюонної системи CDF II).
18. A.Artikov, J.Budagov, I.Chirikov-Zorin, D.Chokheli, V.Kolomoets, M.Lyblin, O.Pukhov, A.Sissakian, G.Bellettini, A.Menzione, A.Scribano, G.Pauletta, B.Grinyov, V.Lebedev, V.Lyubynsky, V.Senchishin, **V.Kovtun**, I.Zaliubovsky, S.Tokar, N.Giokaris, A. Manousakis-Katsikakis. **New-Generation large-area muon scintillation counters with wavelength fiber readout for CDF II** // *Письма в ЭЧАЯ*. – 2006. – Т.3 № 3(132). – С. 81-102. (Дисертант брав участь у розробці прототипів мюонних лічильників установки CDF II).
19. **V.E. Kovtun. The model of realistic photomultiplier response.** – *Journal of Kharkiv University, physical series “Nucl., Part., Fields”* // 2011. – issue 4 (52), № 979 – P. 81-85. (Дисертант знайшов аналітичний вигляд функції відгуку ФЕП).
20. G.A.Kononenko, A.G.Artukh, A.N.Vorontsov, D.A.Kyslukha, S.A.Klygin, **V.E.Kovtun**, Y.M. Sereda, B.Erdemchimeg, V.V.Ostashko, Y.N.Pavlenko. **Detection System of the COMBAS Ftagment Separator** // *Instuments and Experimental Techniques*. – 2015. – Vol.58. – № 3. – P. 337÷344. (Дисертант брав участь у дослідженні, розробці та виміру детекторів).

АНОТАЦІЯ

Ковтун В.Є. Мюонні детектуючі системи установок CDF II (FNAL) і ATLAS (CERN). – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.16 – фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій. Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, 2017.

Дисертація присвячена вирішенню проблеми збільшення набору експериментальних даних при реєстрації топ-кварка на установках CDF II і ATLAS, дослідженню мюонних детектуючих систем тригера 1-го рівня. Аксептанс установки CDF II був збільшен за рахунок системи мюонних лічильників нового покоління. Проведено прецизійні дослідження параметрів детекторів за допомогою нової

методику калібрування фотоприймачів і реальної моделі спектра ФЕП/SiPM. Експериментально показана (на SPS) можливість реєстрації мюонів в HCAL ATLAS і використання мюонів в тригері топ-кварків. Вперше експериментально виміряні втрати мюонів в області енергій $1 \div 150$ Гев. Виконано програму дослідження радіаційної стійкості сцинтиляторів і різних конструкцій мюонних детекторів для колайдерів SSC, Tevatron, LHC, ILC.

Ключові слова: колайдер, топ-кварк, мюонний детектор, адронний калориметр, радіаційна стійкість, пластмасовий сцинтилятор, волоконне зчитування.

АННОТАЦИЯ

Ковтун В.Е. Мюонные детектирующие системы установок CDF II (FNAL) и ATLAS (CERN). – Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика ядра, элементарных частиц и высоких энергий. Харьковський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, 2017.

Диссертация посвящена решению проблемы увеличения набора экспериментальных данных при регистрации топ-кварка на установках CDF II и ATLAS, исследованию мюонных детектирующих систем триггера 1-го уровня. Акцептанс установки CDF II увеличен за счёт системы мюонных счётчиков нового поколения. Проведены прецизионные исследования параметров детекторов с помощью новой методики калибровки фотоприёмников и реальной модели ФЕУ/SiPM. Экспериментально показана (на SPS) возможность регистрации мюонов в HCAL ATLAS и использования таких мюонов в триггере топ-кварков. Впервые экспериментально измерены потери мюонов в области энергий $1 \div 150$ ГэВ. Выполнена программа исследования радиационной стойкости сцинтиляторов и различных конструкций мюонных детекторов для колайдеров SSC, Tevatron, LHC, ILC.

Ключевые слова: колайдер, топ-кварк, мюонный детектор, адронный калориметр, радиационная стойкость, пластмассовый сцинтиллятор, волоконное считывание.

ABSTRACT

Kovtun V.E. The CDF II (FNAL) and the ATLAS (CERN) muon detecting system. - The manuscript.

Thesis for the degree of candidate of physical and mathematical sciences on a specialty 01.04.16 - physics of nuclei, elementary particles and high energies. V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, 2017.

The thesis is devoted to solving the problem of increasing the top-quark experimental data on the CDF II and ATLAS, and the investigation of the muon detection systems. The CDF II acceptance is increased due to the system of muon counters of the new generation. Precision investigations of the detector parameters were carried out using a new method calibration p.h.e. and the real model of the FEU/SiPM. It has been shown experimentally (at SPS) the possibility of recording muons in HCAL ATLAS and using of such muons in the top-quark trigger. At the first time the muon losses in the energy range $1 \div 150$ GeV have been experimentally measured. A program for studying the radiation resistance of scintillators and various designs of muon detectors for colliders SSC, Tevatron, LHC, ILC was carried out.

Keywords: collider, the top quark, the muon detector, hadron calorimeter, radiation resistance, a plastic scintillator, fiber readout.